



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA

**AM- ja DSB-modulaatioiden toteuttaminen
Simulink-ohjelmistolla USRP-
ohjelmistoradioalustalle**

Teemu Liuski

Ohjaaja: Kari Kärkkäinen

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Liusti T.O. (2019) AM- ja DSB-modulaatioiden toteuttaminen Simulink-ohjelmistolla USRP-ohjelmistoradioalustalle. Oulun yliopisto, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, sivuja 37 s.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä esitellään National Instrumentsin USRP ohjelmistoradio NI2900-laitemalli ja sen käyttö MATLAB-Simulink ympäristössä. Työssä esitellään ohjelmistoradion toimintamalli ja toteutetaan modulaattori ja demodulaattori amplitudimodulaatiolle sekä kaksisivukaistamodulaatiolle käyttäen USRP:n Simulink:lle suunniteltuja lohkoja. Tuloksena saadaan moduloituja ja -demoduloituja signaaleja sekä niillä toteutettavia lohkokaavioita, joiden malleja voidaan käyttää toteuttaessa muita modulaatiomenetelmiä samassa ympäristössä. Lopuksi pohditaan USRP toiminnan toteutuksen käyttökokemusta Simulink-ympäristössä.

Avainsanat: USRP, SDR, AM, DSB, MATLAB, Simulink

Liuski T.O. (2019) Implementation of digital AM- and DSB modulations in Simulink-environment using USRP software defined radio. University of Oulu, Degree Program in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 37 pages.

ABSTRACT

In this research paper the USRP NI-2900 software defined radio developed by National Instruments is represented and implemented in MATLAB-Simulink environment. The basic functionalities of software defined radio are represented and digital modulators and demodulators for amplitude and double sideband modulations are implemented using USRPs blocks in Simulink. As a result, modulated and demodulated signals are generated with the designed blocks charts, and the device models can be used for further implementations for another modulation techniques. Finally, the implementation of USRP in Simulink-environment is considered in respect of accessibility.

Keywords: USRP, SDR, AM, DSB, MATLAB, Simulink

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1. JOHDANTO.....	8
2. TEORIA	9
3. USRP-LAITTEEN KÄYTTÖÖNOTTO	14
3.1 Zadig-ajurit USB-portille.....	14
3.2 Yhteyden testaus.....	15
3.3 Lähetin- ja vastaanotinlohkot.....	16
4. AM MODULAATTORIN TOTEUTUS.....	22
5. AM DEMODULAATTORIN TOTEUTUS	25
6. DSB MODULAATTORIN TOTEUTUS	28
7. DSB DEMODULAATTORIN TOTEUTUS	30
8. POHDINTA.....	33
9. YHTEENVETO	34
10. LÄHTEET	35
11. LIITTEET.....	36

ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö on tehty osana elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelman kandidaatintutkintoani langattoman tietoliikenteen keskukselle. Työn idea lähti Langattoman tietoliikenteen harjoitustyö-kurssista, jota haluttiin kehittää siirtymällä LabVIEW ohjelmiston käytöstä jo ennestään tutumpaan ja yleisempään MATLAB-Simulink ohjelmistoon.

Oulussa, helmikuussa 2019.

Teemu Liuski

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

A/D	Analogisesta digitaaliseen
AM	Amplitudimodulaatio
D/A	Digitaalisesta analogiseen
DC	Tasavirta
DDC	Digitaalinen alassekoitus
DSB	Kaksisivukaistamodulaatio
DSP	Digitaalinen signaalikäsittely
DUC	Digitaalinen ylössekoitus
FM	Taajuusmodulaatio
FPGA	Ohjelmoitava logiikkapiiri
GPS	Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä
GSM	Maailmanlaajuinen matkapuhelinjärjestelmä
HDL	Tietokoneen laitteiston ohjauskieli
HW	Laitteisto
IF	Välitaajuus
IQ	Kvadratuurinen IQ-vaihe
IP	Internet protokolla
LTE	Neljännän sukupolven langaton tiedonsiirtotekniikka
MIMO	Moniantennitekniikka
PPS	Pulssia sekunnissa
RF	Radiotaajuus
SDR	Ohjelmistoradio
SISO	Yksiantennitekniikka
UHD	USRP laitteisto-ohjain
USRP	Yleiskäyttöinen ohjelmistoradio päätelaite
WiFi	Langaton lähiverkkotekniikka

Hz	Hertsi
dB	Desibeli
t	aika
$a(t)$	kantoaallon hetkellinen amplitudi
$\theta(t)$	hetkellinen vaihe
$I(t)$	signaalin reaalin osa
$Q(t)$	signaalin imaginäärinen osa
$V_m(t)$	informaatiosignaali
$V_c(t)$	kantoaaltosignaali
$V_{AM}(t)$	amplitudimoduloitu signaali

1. JOHDANTO

Ohjelmistoradiot ovat kehittyvä tietoliikenneteknologia, jota on käytetty paljon viime vuosina. Syy tähän on niiden ainutlaatuisuus kyetä mallintamaan ja kontrolloimaan monimutkaisia analogisia radiotaajuuksia operaatioita kuten modulointi ja demodulointi yksinkertaisesti käyttämällä ohjelmisto- ja ohjelmointiympäristöjä yhdessä ohjelmoitavien FPGA-piirien kanssa. Aiemmin nämä tehtävät vaativat laajamittaista osaamista analogiatekniikasta ja kalliita laitteita, joilla voitiin rakentaa ja testata toteutussuunnitelmia [1].

Ohjelmistokehittäjillä on aina ollut etuna, että he ovat voineet helposti testata ohjelmistoa ja löytää ohjelmointivirheitä ja puutteita ennen seuraavaa kehitysvaihetta. Ohjelmiston muokkaus on huomattavasti nopeampaa ja helpompaa kuin laitteiston muokkaus. Ohjelmistoradio eli SDR (software defined radio) perustuu tekniikkaan, jossa käytetään universaalia laitteistoalustaa RF-signaalien lähetykseen ja vastaanottoon ja jossa käytetyt aaltomuodot ovat määritelty ohjelmistosovelluksilla. Näin ollen SDR mahdollistaa kehittäjän tehdä muutoksia kantotaajuuksiin, modulointikaavoihin sekä lähetettävään dataan kehitysprosessin aikana. Sekä tutkimus- että kehitystyö hyötyvät tästä ominaisuudesta, sillä SDR muuttaa radiolaitteiston ongelmat ohjelmisto-ongelmiksi ja näin ollen niiden testaus ja tulkinta helpottuu. SDR voidaan ohjelmoida mihin tahansa RF-spesifioituun tehtävään kuten GSM tai LTE verkkotekniikkaan, FM-lähetykseen, GPS paikannukseen sekä WiFi tai Bluetooth tiedonsiirtoon [1].

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia ja toteuttaa AM- eli amplitudimodulaatio sekä DSB eli kaksisivukaistamodulaatio-tiedonsiirtojärjestelmien toiminta MATLAB ja Simulink-ohjelmiston avulla käyttäen National Instruments'in valmistamaa USRP-2900 radioalustaa. MATLAB-Simulink ympäristö on hyvin yleinen työkalu tietoliikennetekniikan maailmassa sekä useilla tietoliikennetekniikan kursseilla. Siksi USRP:n käytön opettelu tässä ympäristössä on suotavaa ja siihen annetaan perusteet tässä tutkielmassa. Työssä tutustuttiin ensin laitteeseen, sen ohjausta Simulink-ohjelmistolla ja yksinkertaisten AM sekä DSB modulaattorien ja -demodulaattorien toteuttamiseen ja simulointiin. Saatujen tulosten avulla pohdittiin laitteen käyttökokemusta ja kehitysmahdollisuuksia muihin toteutuksiin.

2. TEORIA

USRP on National Instruments:in tytäryhtiön Ettus Research:in kehittämän ohjelmistoradioiden tuoteperhe. Laitemalleja on useita ja ne on suunniteltu erilaisiin tutkimus ja kehitysympäristöihin. Mallit eroavat muun muassa kaistanleveyden, suorituskyvyn ja taajuusalueen perusteella. Tässä työssä käytetty malli on NI USRP-2900 joka kuuluu Bus-Series sarjaan. Mallin tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 1. Virtalähteenä voidaan käyttää joko tietokoneen USB 3.0 porttia tai mikäli laite yhdistetään USB 2.0 porttiin, tulee laite kytkeä paketissa tulevaan ulkoiseen 6 voltin tasavirtalähteeseen [2].

Taulukko 1. NI USRP-2900 parametrit taulukoituna lähettimelle ja vastaanottimelle

Parametri	Lähetin	Vastaanotin
Taajuus	70 MHz – 6 GHz	70 MHz – 6 GHz
Taajuusporras	< 1 kHz	< 1 kHz
Suurin lähtöteho	20 dBm	-
Suurin tuloteho	-	-15dB
Vahvistusalue	89.75 dB	76 dB
Vahvistusporras	0.25 dB	1.0dB
Taajuustarkkuus	2.5 ppm	2.5 ppm
Suurin hetkellinen reaaliaikainen kaistanleveys	56 MHz	56 MHz
Suurin IQ arvo -jatkuva	15MS/s	15MS/s
Suurin IQ arvo -purske	61.44 Ms/s	61.44 Ms/s
DAC	12 bittiä	12 bittiä
Kohinakerroin	-	5dB - 7dB

Ohjelmistoradiot prosessoivat informaatio-signaalia esittämällä kantataajuussignaalin kahtena muuttujana jakamalla signaalin kahteen osaan: reaalin ja imaginäärinen osa. Näitä osia kutsutaan I- ja Q-näytteiksi. I-näytteet ovat reaaliosia ja Q-näytteet imaginäärisiä. Signaalin jako voidaan esittää matemaattisesti kaavalla 2.1, jossa $a(t)$ on signaalin amplitudi ja $\theta(t)$ signaalin vaihe.

$$\tilde{s}(t) = \text{Re}\{a(t)e^{j\theta(t)}\} = a(t)\cos(\theta(t)) = I(t) + jQ(t) \quad (2.1)$$

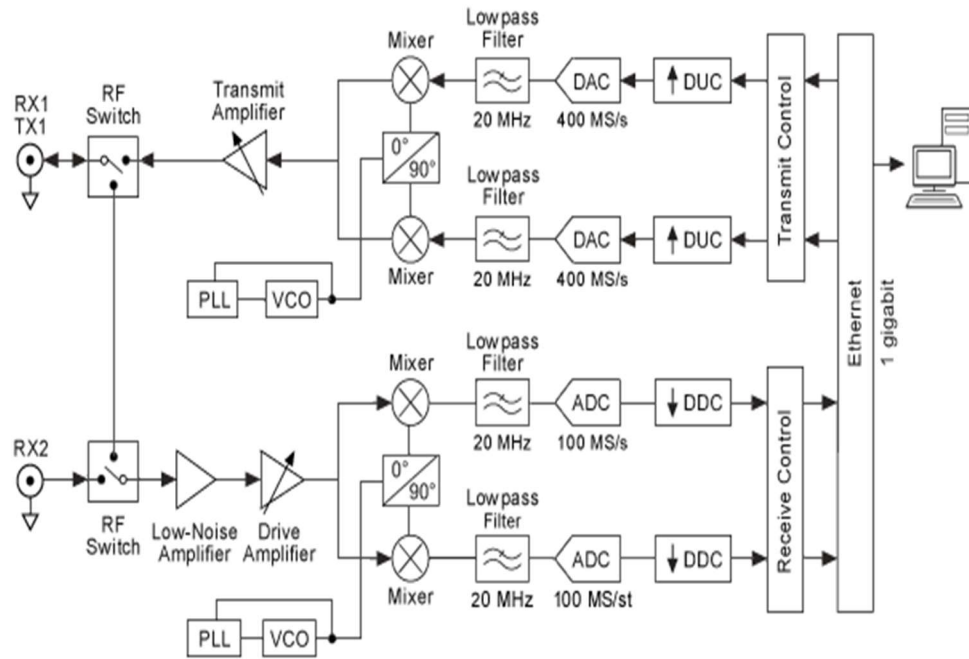
$$e^{j\theta(t)} = \cos(\theta) + j\sin(\theta) \quad (2.2)$$

Kaavassa 2.2 esitellyn Eulerin lauseen avulla voidaan johtaa kaavat 2.3 ja 2.4 joista ilmenee, että I- ja Q-näytteet vastaavat kosinin ja sinin amplitudia vaiheen muuttuessa ja näin ollen voidaan todeta, että I- ja Q-näytteet ovat 90 asteen vaihe-erossa toisistaan. Tämän 90 asteen eron takia I- ja Q-näytteitä kutsutaan myös ”in-phase”, $I(t)$, ja ”quadrature”, $Q(t)$, komponenteiksi signaalista [3].

$$I(t) = a(t)\cos(\phi(t)) = \text{Re}(a(t)e^{j\theta(t)}) \quad (2.3)$$

$$Q(t) = a(t)\sin(\phi(t)) = \text{Im}(a(t)e^{j\theta(t)}) \quad (2.4)$$

SDR:ien toiminnan taustalla on DSP eli digitaalinen signaalinkäsittely. Sen avulla voidaan korvata iso osa radion laitteistolla tehtävästä analogisesta signaalikäsittelystä. SDR käyttää implementointiinsa teknologiaa, jossa osa tai kaikki fyysisen kerroksen funktiot ovat ohjelmistolla määriteltäviä. SDR sisältää tyypillisesti ainoastaan kaikista välttämättömimmät langattoman tiedonsiirron laitteistot, joilla lähetetty digitaalinen kantataajuussignaali voidaan muuntaa radiosignaaliksi ja vastaanotettu radiosignaali digitaalseksi kantataajuussignaaliksi. Näitä laitteiston osia ovat muun muassa analogisesta digitaaliseen, eli A/D muunnin, digitaalisesta analogiseen, eli D/A muunnin sekä FPGA-piirit, jotka sisältävät ohjelmistolla konfiguroitavan lähetinvastaanotin-piirin eri kantataajuuksien signaalien käsittelyn. Lisäksi ohjelmistoradio sisältää vahvistimia ja kantoaalto-oskillaattoreita ja suodattimia. Työssä käytetyn NI USRP-2900 laitteen systeemitason kaavio on esitetty kuvassa 1, jonka toimintaa avataan seuraavaksi hieman enemmän [3].



Kuva1. USRP NI-2900 mallin systeemitason toiminta esitettynä lohkokaaavion avulla.

Vastaanottokeiju alkaa hyvän herkkyyden omaavasta etuosasta (front end), joka kykenee vastaanottamaan erittäin heikkoja signaaleja ja digitalisoimaan ne käyttäen suoramuuunnosvastaanottimen periaatetta I- ja Q- näytteisiin. Tämän jälkeen signaali kulkee nopean A/D muuntimen ja digitaalisen alaskonvertterin (DDC) läpi. DDC alentaa näytteenottotaajuutta ja paketoii I- ja Q- näytteet isäntäkoneelle (host) lähetystä varten käyttäen Gbit/s Ethernet-yhteyttä. Lähetysketju alkaa isäntäkoneelta, jossa I- ja Q-näytteet luodaan ja lähetetään Ethernet kaapelia tai USB-väylää pitkin USRP laitteistoon. Digitaalinen ylöskonvertteri (DUC) valmistelee signaalin D/A muuntimelle, jonka jälkeen I- ja Q- näytteet sekoitetaan ja ylöskonvertoidaan. Tämän jälkeen RF-signaali vahvistetaan ja lähetetään toimivaa yhteyttä pitkin vastaanottimelle [4].

Amplitudi modulaatio eli AM on yksi varhaisimmin keksitystä modulaatiotekniikoista ja se on antanut pohjan useille muille myöhemmin kehitetyille modulaatiotekniikoille. Sitä käytetään edelleen yleisesti tiedonsiirroissa, joissa informaatio esimerkiksi puhe välitetään kantoaallon amplitudin vaihteluna. Amplitudimodulaation etuja ovat muun muassa sen yksinkertainen implementointi, demoduloinnin helppous käyttämällä hyvin pieni määrä komponentteja sekä se, että AM vastaanottimet ovat halpoja, sillä monimutkaisimpia komponentteja ei piirissä tarvita. Nämä ovat suurimmat edut ja yksi syy, miksi amplitudimodulaatio on edelleen

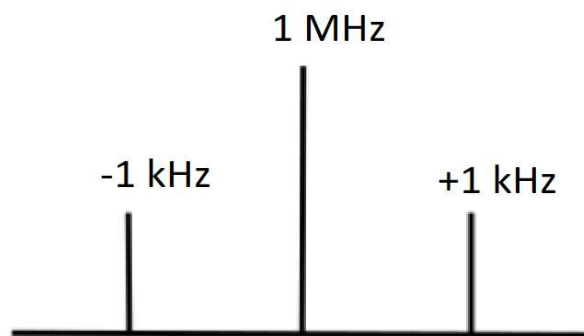
käytössä. Amplitudimodulaatiolla on kuitenkin muutamia heikkouksia. Se ei ole kovin tehokas, kun tarkastellaan tehon käyttöä ja sen tuottamaa signaalikohinasuhdetta. AM spektri tarvitsee kaistanleveyttä kaksi kertaa sen moduloivan signaalin kaistanleveyden verran. Tämän takia AM on enemmän käyttökelpoinen matalilla radiotaajuuksilla. AM on lisäksi altis korkeille kohinatasoille, sillä suurin osa kohinasta on amplitudipohjaista, joten AM tunnistimet ovat niille herkkiä [5].

Matemaattisesti tarkasteltuna amplitudimodulaatio on yksinkertainen: lähetin käyttää kosini- tai sinimuotoista informaatio-signaalia $V_m(t)$ muuttaakseen kanta-aallon $V_c(t)$ amplitudia A tavoitteena tuottaa moduloidun signaalin $V_{AM}(t)$. Kanta-aalto esitetään kaavan 4.1 avulla ja moduloitu signaali kaavan 4.2 avulla, missä f_c tarkoittaa kanta-aaltosignaalin taajuutta ja ϕ signaalin vaihetta [6].

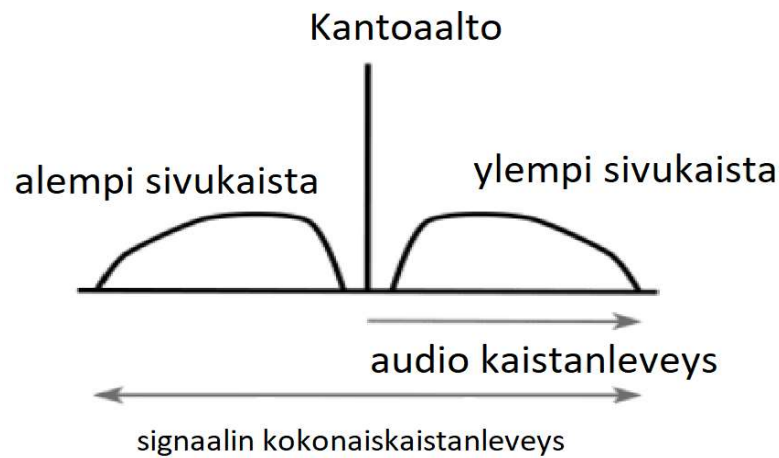
$$V_c(t) = A \sin(2\pi * f_c * t + \phi) \quad (4.1)$$

$$V_{AM}(t) = \{A + V_m(t)\} \sin(2\pi * f_c * t + \phi) \quad (4.2)$$

Kun kanta-aaltoa on moduloitu, molemmille puolille vakaata kanta-signaalia muodostuu sivukaistoja, jotka kantavat todellisen informaation modulaatiossa. Tämä voidaan havainnollistaa kuvan 2 avulla: 1 MHz kanta-aaltosignaali on moduloitu 1 kHz signaalilla. Näin syntyy kaksi vakaata sivukaistaa kanta-aallon molemmin puolin. Mikäli vakaat sivukaistat korvataan esimerkiksi audiosignaaleilla, ne muodostavat useita eri taajuuksia ja siten alemman ja ylemmän sivukaistan kuten kuvassa 3. Näin todetaan aiemmin esitetty väite, että AM spektri tarvitsee kaistanleveyttä kaksi kertaa sen moduloivan signaalin kaistanleveyden verran [6].



Kuva 2. Esimerkki kanta-aallon ylä- ja alapuolelle muodostuvista sivukaistoista kanta-aaltotaajuudella.



Kuva 3. Havainnollistaminen, kuinka sivukaistat muodostavat omat kaistanleveydet.

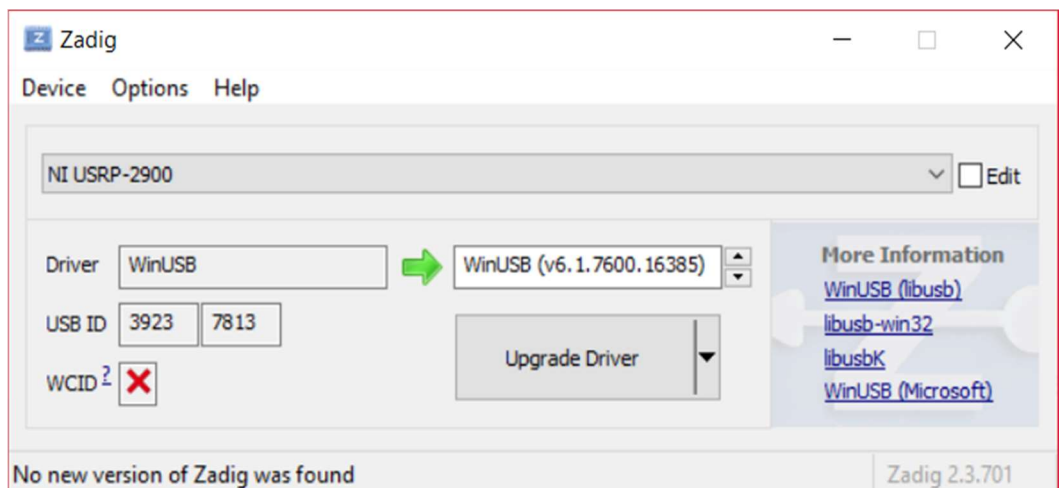
DSB eli kaksivukaistamodulaatio on koherentti modulaatiomenetelmä, joka tarvitsee vaihekoherentin kantoaallon vastaanottimeen. DSB:n laskennallinen hyötysuhde on sata prosenttia, sillä sen koko teho on sivukaistoissa, jotka sisältävät informaatiota toisinkuin amplitudimodulaatiossa, jossa suurin osa tehosta on kantoaaltokomponentissa. DSB on hyvin samankaltainen amplitudimodulaatioon verrattuna. Se tarvitsee saman suuruisen kaistanleveyden kuin AM. Erona on kuitenkin se, että amplitudimodulaatiossa on signaaliin lisätty biasjännite, joka tulee esille modulaatioindeksin kautta. Lisäksi DSB modulaatiossa ei lähetetä kantoaaltoa kuten AM:ssa [7].

3. USRP-LAITTEEN KÄYTTÖÖNOTTO

Jotta ohjelmistoradiota päästään käyttämään MATLAB:n avulla, tulee tiettyjä lisäosia olla asennettuna tietokoneeseen. MATLAB ja Simulink versioiden tulee olla vähintään 2011a, sekä seuraavat lisäosat on oltava asennettuina: *Communications System Toolbox*, *DSP System Toolbox* sekä *Signal Processing Toolbox*. Kun nämä ovat valmiita, pystytään asentamaan ohjelmistoradiota ohjaava lisäosa *USRP Support Package from Communications System Toolbox* [8].

3.1 Zadig-ajurit USB-portille

Kun ohjelmistoradio kytketään ensimmäisen kerran tietokoneeseen, ilmoittaa kone ajurien täsmäämättömyydestä, mikäli koneessa ei ole asennettuna National Instruments'in omaa LabVIEW-ajuria. Tietokoneeseen tulee siis ladata ohjelma, joka korvaa ajurit USB portille. *Zadig* ohjelma asentaa WinUSB ajurin helposti, jonka jälkeen tietokone tunnistaa ohjelmistoradion ja sen käyttö MATLAB:lla voidaan aloittaa. Ajurien asennusohjelman käyttöliittymä on esitetty kuvassa 4. Ilman kyseinen ohjelman asennusta, MATLAB ei tunnista ohjelmistoradiota [9].



Kuva 4. Zadig ajurien päivitysohjelma.

3.2 Yhteyden testaus

Seuraavaksi käynnistetään MATLAB ja varmistetaan ohjelmistoradion toimiva yhteys tietokoneeseen. Komennolla *findsdru* tietokone etsii siihen kytketyt ohjelmistoradiot ja testaa niiden yhteydet. Tuloksena saadaan kuvan 5 esittämä luettelo. NI USRP-2900 malli antaa alustan nimeksi B200 ja ilmoittaa sarjanumeron, joka löytyy myös laitteen pohjasta. B200 on National Instruments'in tytäryhtiön Ettus Research'in valmistama tuote, joka vastaa USRP-2900 laitetta. USB-ajurin vaihto tarvitaan, koska MATLAB ei tue National Instruments'in omaa B200-laitemallia. Kyseinen malli ei ilmoita IP osoitetta toisinkuin osa muista malleista. Sarjanumero on myös ilmoitettu ja sen voi tarkastaa laitteen pohjasta varmistaakseen, että yhteys on muodostettu oikeaan laitteistoon. Mikäli yhteys toimii hyvin, voidaan simuloinnit aloittaa. Muussa tapauksessa MATLAB ilmoittaa statuksen kohdalla muun kuin ”Success”. NI USRP-2900 malli päivittää automaattisesti ohjelmistoradion laitteiston ajurit eli UHD: n. Mikäli käyttäjä haluaa tarkempaa tietoa käytettävästä ohjelmistoradiosta, komennolla *probesdru* voidaan nähdä tarkat tiedot ohjelmistoradion lähetin- ja vastaanotin porteista. Kuvassa 6 on esitetty työssä käytetty laitemalli. Lähetin- ja vastaanotin porttien välille on muodostettu yhteys koaksiaalikaapelin avulla ja toinen pää on vaimennettu 30 dB, 50 ohmin vaimentimella.

```
ans =  
  
  struct with fields:  
  
    Platform: 'B200'  
    IPAddress: ''  
    SerialNum: '30AA14D'  
    Status: 'Success'
```

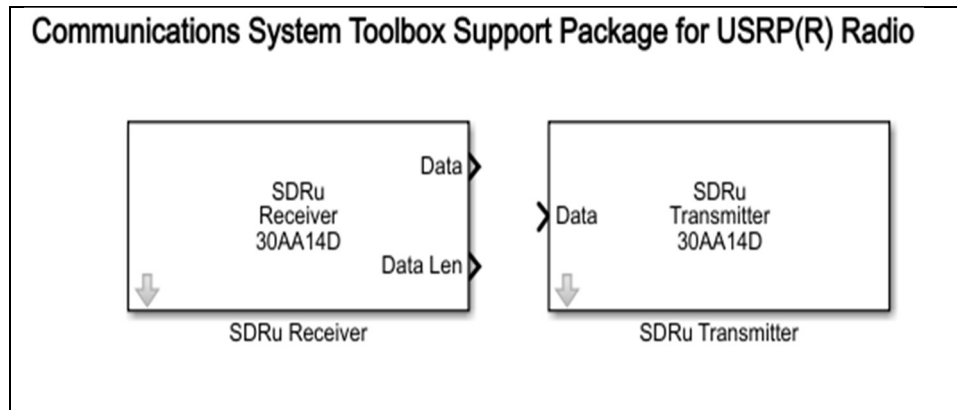
Kuva 5. Toimiva yhteys MATLAB:n komentorivillä esitettynä.



Kuva 6. Työssä käytetty NI USRP-2900 laite ja siihen kytketty koaksiaalikaapeli

3.3 Lähetin- ja vastaanotin lohkot

Simuloitava järjestelmä rakennetaan käyttäen Simulink:n lohkoja, jotka lopulta kytketään ohjelmistoradion lähetinlohkoon. Ohjelmistoradion laitteisto käsittelee informaation ja lähettää sen lähetysantennia tai SMA-koaksiaalikaapelia pitkin vastaanottimelle. Vastaanottolaitteisto käsittelee tulevan informaation ja syöttää sen vastaanotinlohkolle. Tämä lohko on kytketty muihin Simulink:n lohkoihin, jotka käsittelevät informaation halutulla tavalla. Simulink:n lohkoilla voidaan näin helposti muun muassa esittää lähetetty ja vastaanotettu signaali kuvaajien ja spektrien avulla sekä muokata vastaanotettua signaalia halutulla tavalla. Kun yhteys ohjelmistoradion ja tietokoneen välillä on todettu toimivaksi, voidaan simulointien suunnittelu aloittaa. Tässä työssä simuloinnit luodaan Simulink:n avulla, mutta ne on myös mahdollista toteuttaa käyttämällä pelkkää alemman tason MATLAB koodia. Komennolla *sdrplib* saadaan avattua Simulink, jossa on valmiina lähetin- ja vastaanotinlohkot, jotka ovat perusta simuloinneille ohjelmistoradiolla. Lohkot on esitelty kuvassa 7 ja niiden ympärille luodaan lähetys- ja vastaanottoaaviot molemmat omiin ikkunoihinsa käyttöympäristössä.



Kuva 7. Ohjelmistoradion lähetin- ja vastaanotinlohko.

Ensimmäisenä tutkitaan lähetinlohkoa, jonka avaamalla aukeaa kuvan 8 esittämä parametritaulukko. Lähetinlohko ottaa vastaan dataporttiin sarakevektorin tai matriisimuotoisen tulosignaalin Simulink:sta ja lähettää signaalin ja datan ohjelmistoradiolle käyttäen UHD:ta. NI-2900 on SISO (single input single output) malli eli se käyttää vain yhtä kanavaa, jolloin lähetettävä data esitetään sarakevektorina. MIMO (multiple input multiple output) malleissa on käytössä monta kanavaa, jolloin lähetettävä data esitetään matriiseina, joissa jokaisen kanavan datalla on oma sarakkeensa. Ensimmäisestä valikosta valitaan laitteen malli eli NI-2900 tapauksessa B200. Mikäli yhteys on aiemmin testattu toimivaksi, on seuraavassa valikossa käytettävän laitteen sarjanumero. Koska NI-2900 on SISO-mallin laite, seuraavan kohdan kanavakartoituksen kohtaan valitaan numero yksi [10].

Tämän jälkeen määritetään parametriarvoja simuloinnille. Keskitaajuus, offset-taajuus paikallisoskillaattorille ja vahvistus voidaan määrittellä joko parametritaulukkoon tai ulkoisesti omalla portilla Simulink:ssä. Keskitaajuus on positiivinen ja äärellinen luku, joka voi vaihdella vain, mikäli käytössä on MIMO-malli. Oletusarvo on 2.45 GHz, jota ei tarvitse muuttaa, mutta on varmistettava, että vastaanotinlohkolla on sama keskitaajuus. Paikallisoskillaattorin offset-taajuus esitetään skalaarina lukuna ja NI-2900 mallilla se on yleensä nolla. Offset-taajuuden avulla voidaan siirtää keskitaajuutta pois häiriöstä tai USRP:n aiheuttamasta ylivärähtelystä. Offset taajuus ei siis vaikuta itse keskitaajuuteen vaan radion välitaajuuteen [10].

PPS- (pulse per second) ja kellotuslähde ovat määriteltä joko sisäisesti USRP:ssä tai ulkoisesti. PPS eli montako pulssia sekunnissa lähetin lähettää voidaan määrittellä signaaligeneraattorilla ja kellotuslähde 10 MHz kellotusgeneraattorilla. Seuraavassa

valikossa määritellään pääkellon taajuus, jonka tulee olla NI-2900 mallilla välillä 5MHz – 56 MHz. Oletusarvo on 32 MHz ja kyseinen taajuus kertoo A/D ja D/A muuntimien kellotaajuudet. Interpolaatio voidaan myös määritellä parametrilla tai ulkoisella portilla. Radio käyttää interpolaatioparametria ylöskonvertoidessa kompleksista kantataajuussignaalia IF (intermediate frequency) -signaaliksi. NI-2900 mallilla parametriarvo voi olla mikä tahansa kokonaisluku väliltä 1-512. Seuraavaksi määritellään lähetettävän informaation parametreja. Data tyyppin valinnassa käytetään joko int16 tai int8 parametreja. Int16 tarkoittaa, että käytössä on 16-bittinen lähetys ja int8:ssa 8-bittinen. Int16 saavuttaa korkeamman tarkkuuden, mutta int8 on lähes kaksi kertaa nopeampi lähetyksessä kuin int16. Oletuksena on int16, jolloin jokainen lähetysinformaation kompleksinen näyte sisältää 32 bittiä joista 16 on I-näytteitä ja 16 Q-näytteitä. Viimeisenä voidaan valita, että halutaanko sallia ulostuloportti, joka ilmaisee kadonneet näytteet lähetyksestä eli alivuodon. Porttiin kytketään lohko, joka näyttää arvoja 0 tai 1. Mikäli arvo on nolla, näytteitä ei ole kadonnut ja arvolla 1 näyte on kadonnut. Tämän avulla voidaan reaaliaikaisesti seurata ohjelmistoradion toimintaa ja huomata mahdolliset virhetilanteet. Käyttöön voidaan valita myös purskelähetysmuoto, joka tuottaa radiolle katkeamatonta kuvaa ilman kadonneita näytteitä. Tämä muoto valitaan yleensä, kun simuloidaan malleja, joita ei voi ajaa reaaliajassa. Mikäli tämä malli valitaan, tulee kuvien määrä yhdessä purskeessa määritellä kokonaislukuna [10].

Block Parameters: SDRu Transmitter

Send data to the Universal Software Radio Peripheral (USRP).

Device

Platform: B200

USRP serial number: 30AA14D

Info

Control

Channel mapping: 1

Source	Desired Value
Center frequency (Hz):	2.45e9
LO offset (Hz):	0
Gain (dB):	8

PPS source: Internal

Clock source: Internal

Master clock rate (Hz): 32e6

Interpolation: 512

Transport data type: int16

Outputs

☐ Enable underrun output port

Buffering

☐ Enable burst mode

OK Cancel Help Apply

Kuva 8. USRP:n lähetinlohkon parametritaulukko.

Vastaanotinlohko koostuu pääosin samoista parametreista kuin lähetinlohko. Vastaanottimen parametrit on esitetty kuvassa 9, jossa ensimmäisenä valitaan oikea laitealusta ja sarjanumeroa vastaava laite. Kanavakartoitus on jälleen yksi, sillä käytössä on vain yksi vastaanotinportti. Vastaanotinlohko ottaa vastaan informaatiota ohjelmistoradiolta käyttäen UHD:ta. Lohko syöttää ulostuloonsa sarakevektorin tai matriisisignaalin korjatuilla rivimäärillä. Kuten lähetinlohkossa, myös tässä keskitaajuus, paikallisoskillattorin offset taajuus, vahvistus, PPS sekä kellotuslähde voidaan määritellä sekä sisäiseksi että ulkoiseksi portiksi.

Vastaanottimessa on hyvä käyttää suurempaa vahvistusta signaalin laadun parantamiseksi. Siksi vastaanotinlohkon oletusarvo vahvistukselle on 32 dB. Pääkellon taajuus on myös vastaanotinlohkossa oletuksena 32 MHz, jonka jälkeen määritellään decimation-parametri. Tämä parametri saa samoja kokonaislukuarvoja kuin lähetinlohkon interpolaatioparametri väliltä 1-512. Decimation-parametrin avulla radio alaskonvertoi IF-signaalin takaisin kompleksiseksi kantataajuussignaaliksi. Vastaanotinlohkosta Simulink:iin lähetettävän informaation tyyppiä voidaan jälleen valita joko int8 tai int16 riippuen tulosten tarkkuusvaatimuksista [11].

Vastaanottimesta voidaan myös tutkia kadonneet näytteet eli ylivuodon overrun-portista. Silloin tulee spesifioida näytteistysaika skalaarina arvona. Jotta Simulink:n näytteistysaika vastaa reaaliaikaa, tulee se määritellä kaavalla 3.1.

$$\text{näytteistysaika} = \frac{\text{decimation-parametri}}{\text{pääkelloon taajuus}} \quad (3.1)$$

Näin ollen, mikäli decimation-parametri muuttuu simuloinnin aikana, radion tiedonsiirtonopeus muuttuu, mutta Simulink:n näytteistysaika ei. Vastaanotinlohkon lähdön datatyyppi voidaan valita joko samaksi kuin lähetetty data, single-tyypiksi tai double-tyypiksi. Jos datatyyppi on sama kuin lähetyksessä, on se joko int8 tai int16. Int8 on arvoltaan välillä [-128 127] ja sisältää 8-bittisiä I- ja Q-näytteitä ja int16 on arvoltaan välillä [-32768 32767] ja sisältää 16-bittisiä I- ja Q-näytteitä. Single- ja double-tyypin lähtödata on arvoltaan välillä [-1 1]. Single-tyyppi käyttää 32 bittiä muistia, kun taas double-tyyppi 64 bittiä. Viimeisenä määritellään, kuinka monta näytettä esiintyy yhdessä aikaikkunassa positiivisena kokonaislukuna. Kuten lähetinlohkossa, voidaan vastaanotinlohkossa käyttää pursketilaa, jolloin kuvien määrä yhdessä purskeessa määritellään kokonaislukuna [11].

Block Parameters: SDRu Receiver [X]

SDRu Receiver
Receive data from the Universal Software Radio Peripheral (USRP).

Device

Platform: B200

USRP serial number: 30AA14D

Info

Control

Channel mapping: 1

	Source	Desired Value
Center frequency (Hz):	Dialog	2.45e9
LO offset (Hz):	Dialog	0
Gain (dB):	Dialog	32
PPS source:		Internal
Clock source:		Internal
Master clock rate (Hz):		32e6
Decimation:	Dialog	512
Transport data type:		int16

Outputs

☐ Enable overrun output port

Sample time: 1

Output data type: Same as transport data type

Samples per frame: 362

Buffering

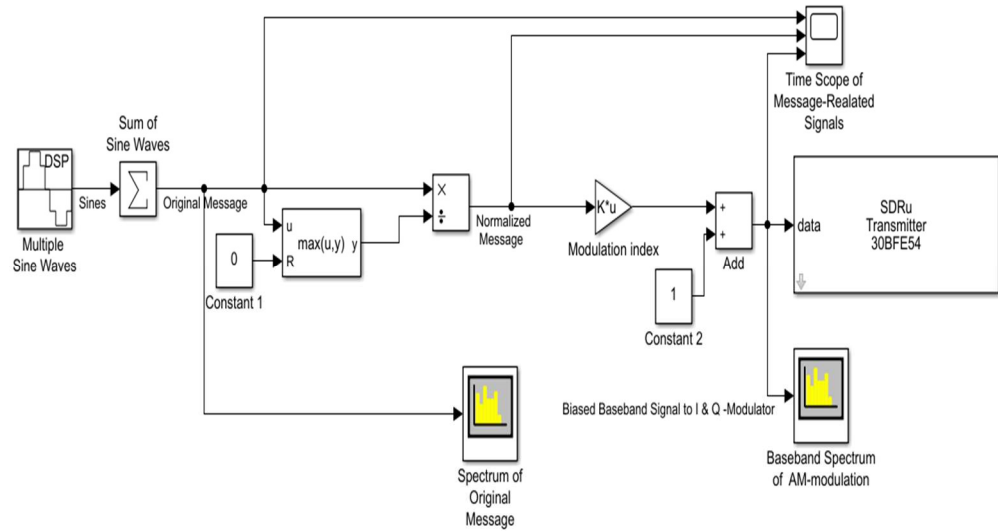
☐ Enable burst mode

OK Cancel Help Apply

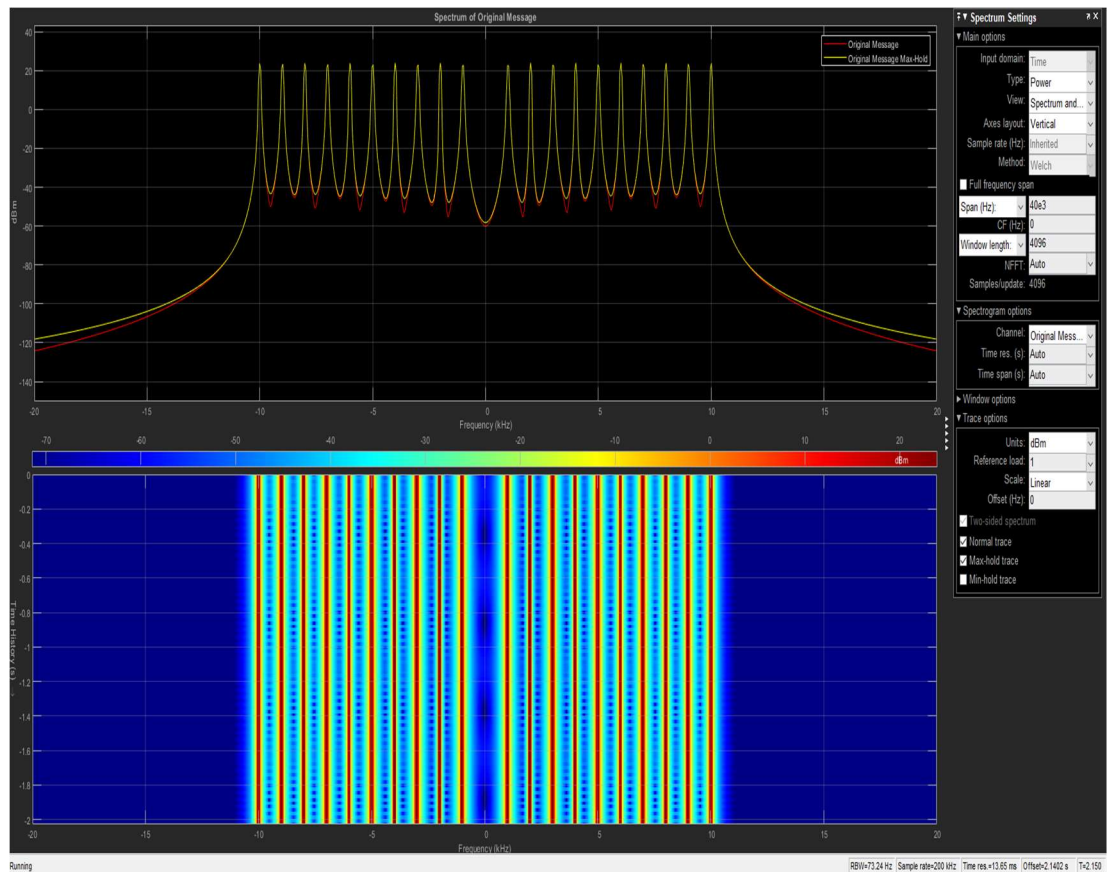
Kuva 9. USRP:n vastaanotinlohkon parametritaulukko.

4. AM-MODULAATTORIN TOTEUTUS

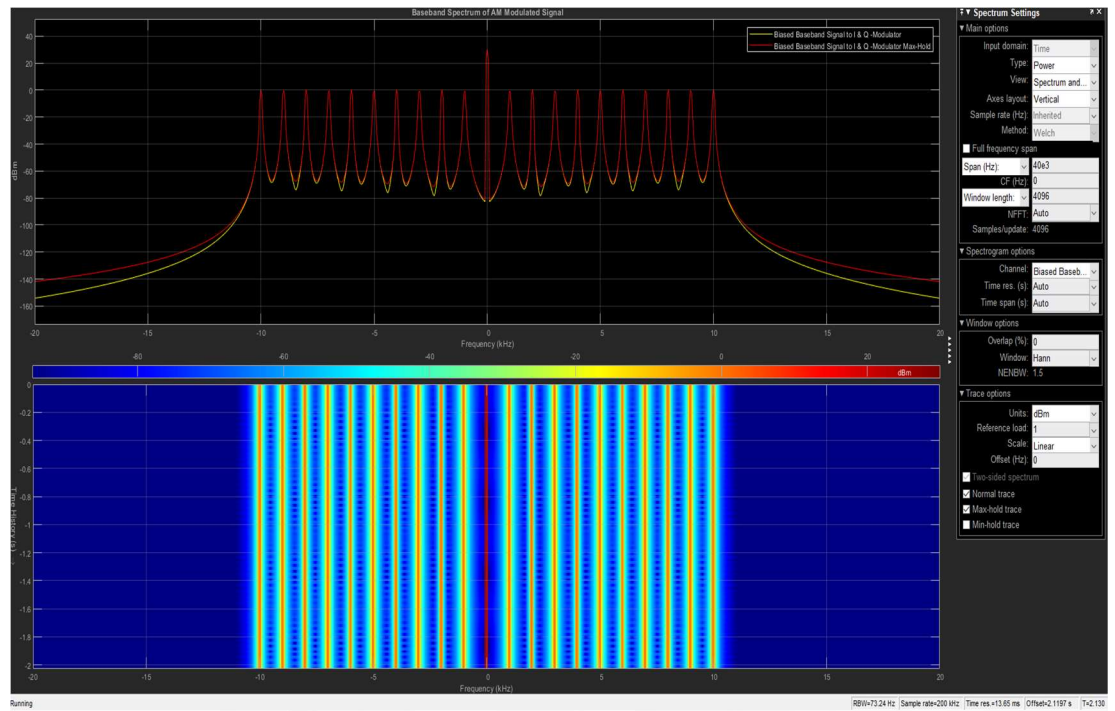
Seuraavissa kappaleissa esitellään työssä toteutetut modulaattori ja demodulaattori AM- ja DSB-modulaatioille. Ensimmäisenä kuvassa 10 on esitetty AM-modulaattorin lohkokaavio Simulink-ympäristössä. Informaatio-signaali luodaan *Multiple Sine Waves* lohkokossa, jossa signaalille voidaan määritellä muun muassa amplitudi, taajuus sekä vaihesiirto. Siniaallot summataan yhteen *Sum of Sine Waves* lohkokossa, jonka jälkeinen signaalispektri on esitetty kuvassa 11. Seuraavaksi tapahtuu informaatio-signaalin normalisointi, jonka jälkeen signaali kerrotaan modulaatioindeksillä. Modulaatioindeksi mittaa amplitudin vaihtelun laajuutta moduloimattoman signaalin suhteen eli, kuinka paljon moduloitu signaali vaihtelee staattiselta tasolta. Modulaatioindeksi saadaan laskettua jakamalla modulaatio-signaalin pienimmän arvon itseisarvo biasjännitteellä. Indeksillä saa arvoja välillä 0 ja 1 ja esimerkiksi tässä simuloinnissa käytetty indeksiarvo 0.5 tarkoittaa, että signaali nousee kertoimella 0.5 ja laskee näin ollen kertoimella 0.5. Tästä signaali siirtyy lopulta USRP:n lähetyslohkoon. Moduloidun signaalin spektri on esitetty kuvassa 12, josta voidaan huomata moduloinnin vaikutus alkuperäiseen informaatio-signaaliin, sillä kuvaan on ilmestynyt kantoaallon spektrikomponentti. Signaalin amplitudin vaihtelu on myös kuvattu kuvassa 13, josta voidaan nähdä eri simulaatiovaiheiden vaikutus amplitudiin. Alkuperäisessä informaatio-signaalissa amplitudi vaihtelee -8 ja 8 välillä, kun taas normalisoitu signaali vaihtelee -1 ja 1 välillä ja moduloitu signaali modulaatioindeksin vaikutuksen jälkeen enää 0.5 ja 1.5 välillä.



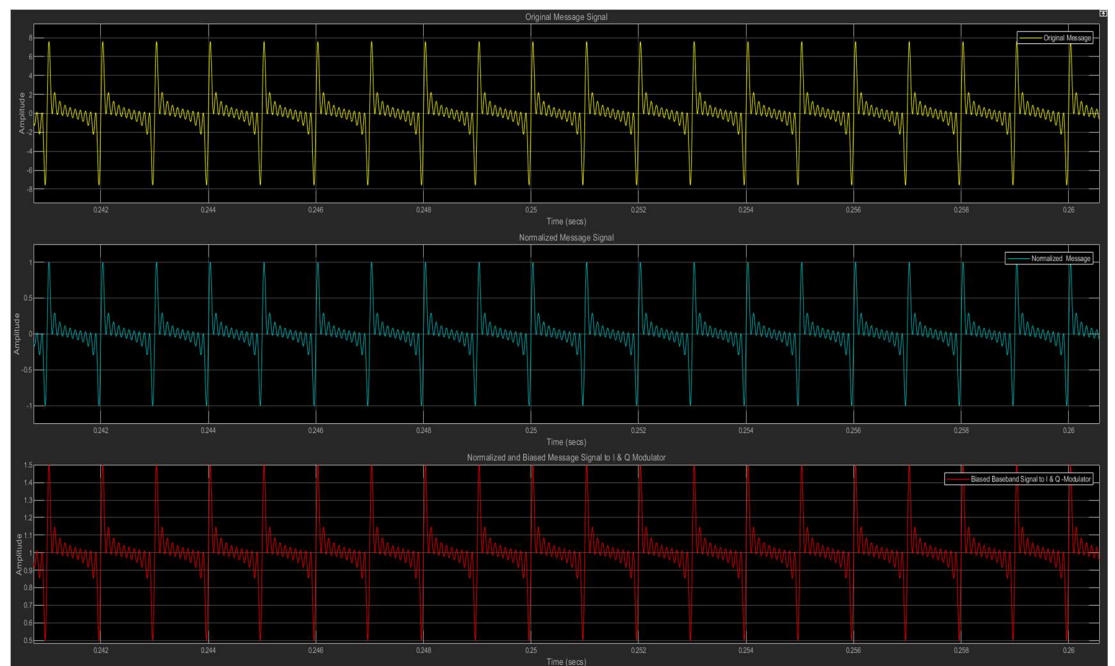
Kuva 10. AM-modulaattorin lohkokaaio Simulink-ympäristössä.



Kuva 11. Informaatio-signaalin spektri ennen modulointia.



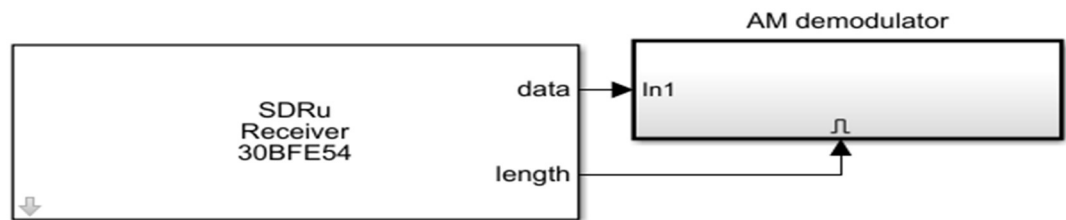
Kuva 12. AM-moduloidun signaalin spektri, joka lähetetään vastaanottimelle.



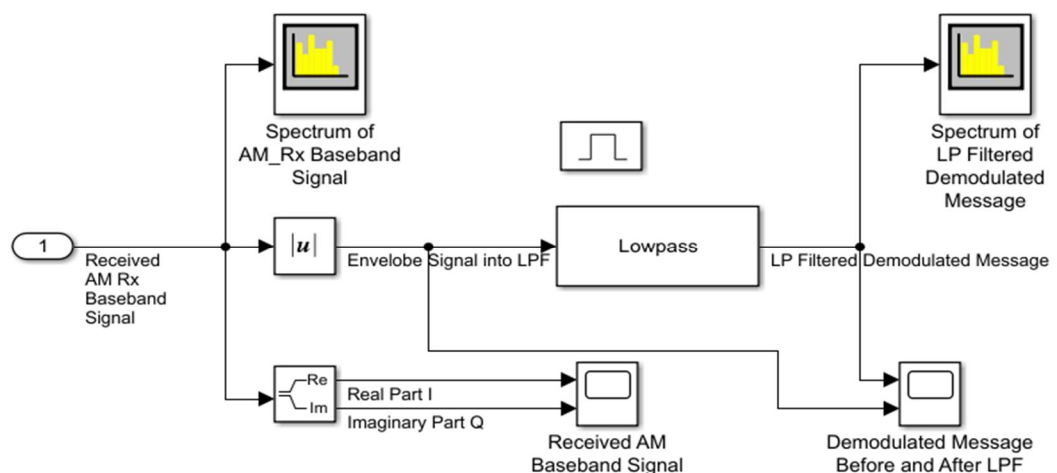
Kuva 13. AM-signaalin amplitudin vaihtelu esitettynä eri vaiheissa modulointia.

5. AM-DEMODULAATTORIN TOTEUTUS

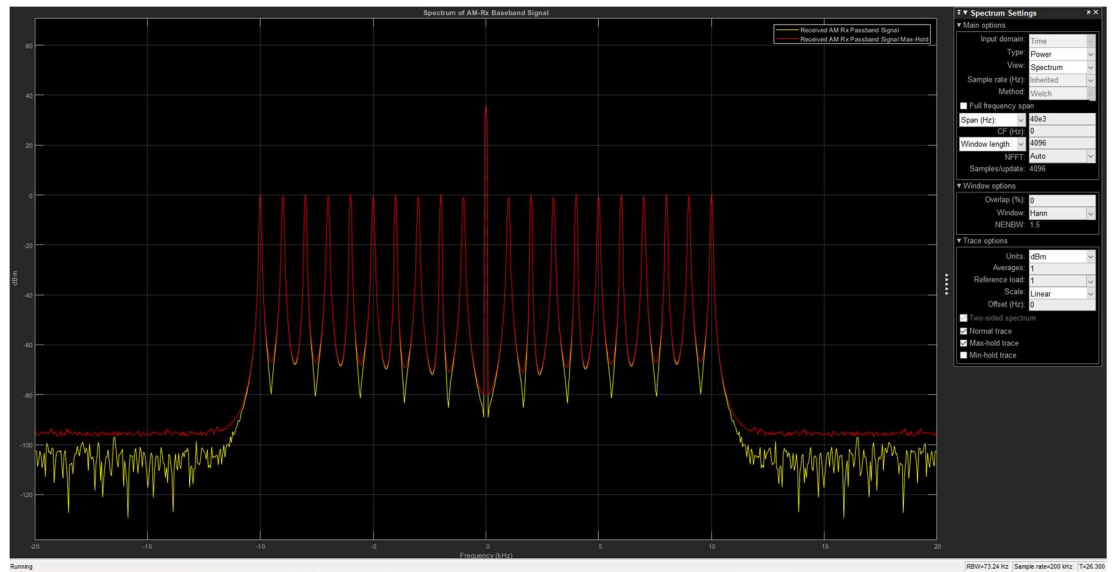
Seuraavaksi tarkastellaan käytettyä AM-demodulaattorin rakennetta. Lähetetty signaali vastaanotetaan kuvan 14 esittämässä lohkokaaviossa, joka alkaa USRP:n vastaanotinlohkolla. Tähän lohkoon on luotu alijärjestelmä itse demodulaattorille, joka on tarkemmin esitetty kuvassa 15. Vastaanotetusta signaalista otetaan itseisarvo, jonka jälkeen se on mahdollista siirtää alipäästösuodattimelle. Ennen tätä voidaan kuitenkin nähdä vastaanotetun kantataajuussignaalin spektri kuvassa 16. Lisäksi kuvassa 17 on vastaanotetun kantataajuussignaalin reaaliset ja imaginääriset osat esitettynä molemmat omissa kuvaajissaan. Alipäästösuodattimessa signaalista poistuu korkeataajuiset komponentit ja matalataajuiset signaalit pääsevät läpi. Alipäästösuodattimen vaikutus voidaan havaita kuvasta 18, jossa on esitetty signaalin muoto ennen ja jälkeen suodattimen. Viimeisenä on myös havainnollistettu signaalin spektri alipäästösuodattimen jälkeen kuvassa 19. Jotta suodatetussa sanomassa esiintyvä DC-komponentti saataisiin häviämään, tulisi DC-jännite estää kondensaattorilla.



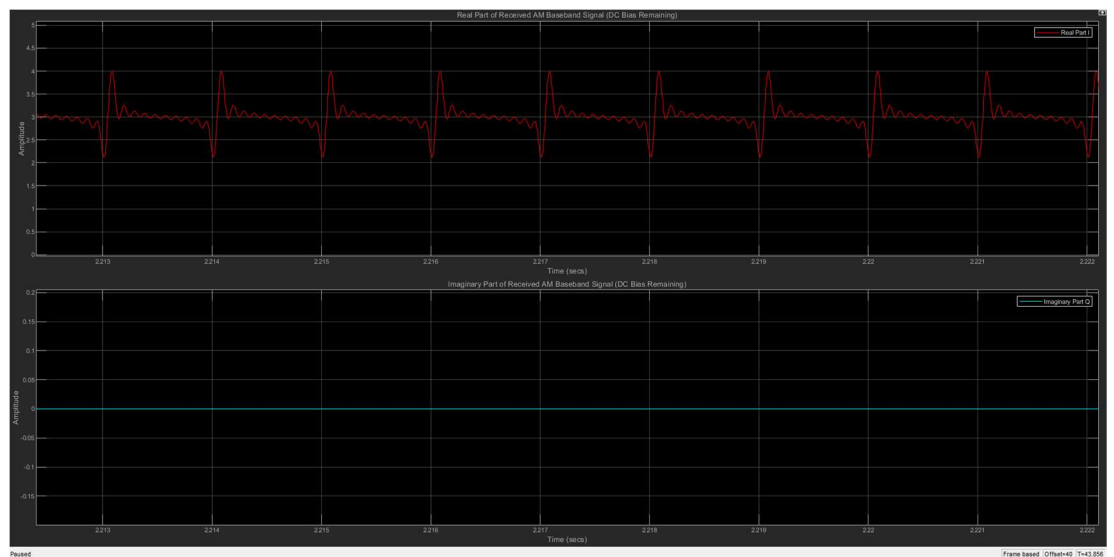
Kuva 14. Käytetyn AM-demodulaattorin lohkokaavio.



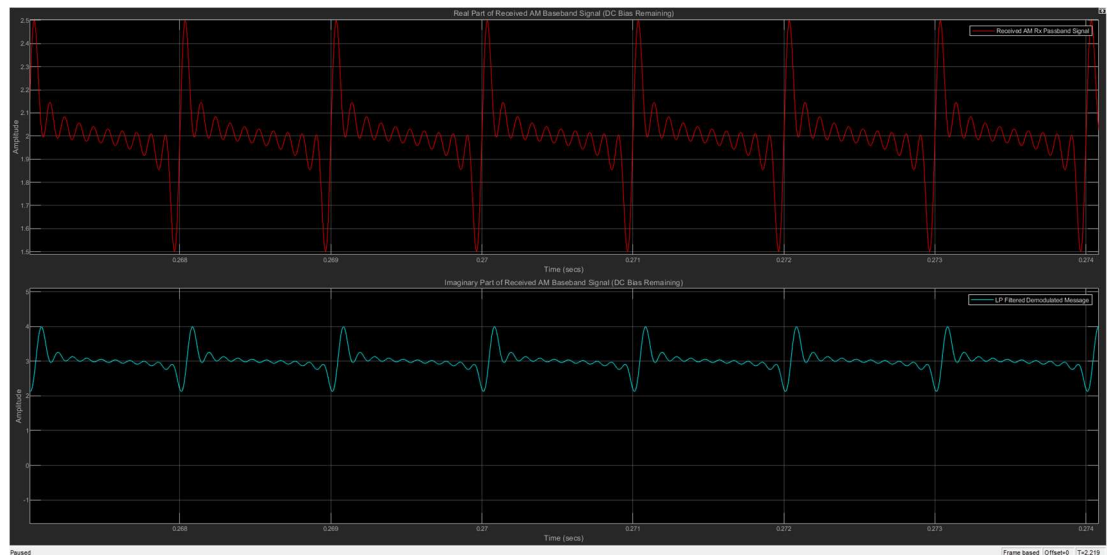
Kuva 15. AM-demodulaattorin alisysteemin lohkokaavio avattuna.



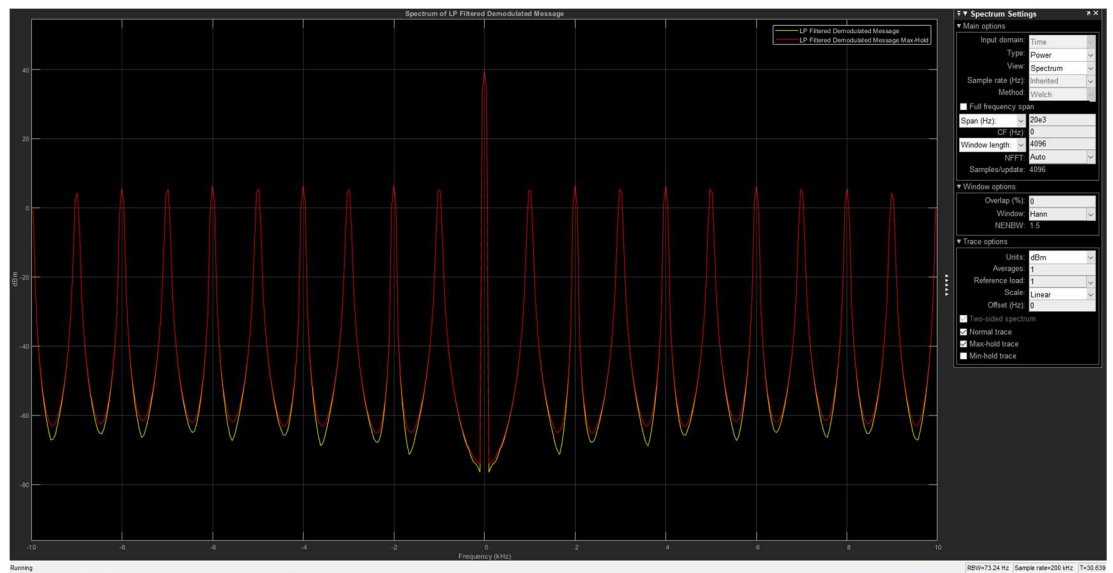
Kuva 16. Vastaanotetun AM-moduloidun kantataajuussignaalin spektri.



Kuva 17. Vastaanotetun AM-moduloidun kantataajuussignaalin reaaliset ja imaginääriset osat.



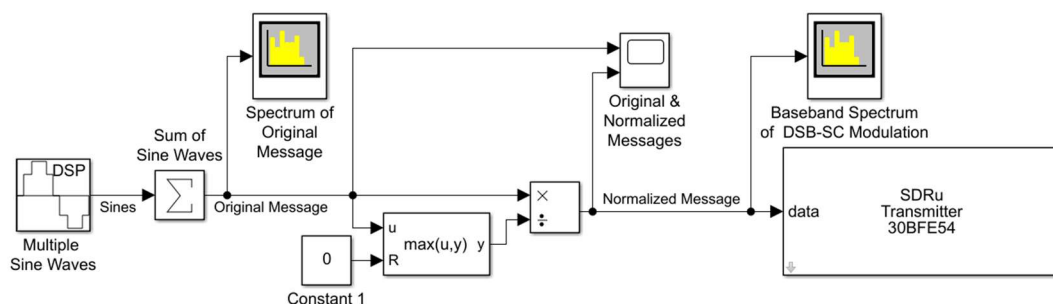
Kuva 18. Sanomasignaalin muoto ennen ja jälkeen alipäästösuodatinta.



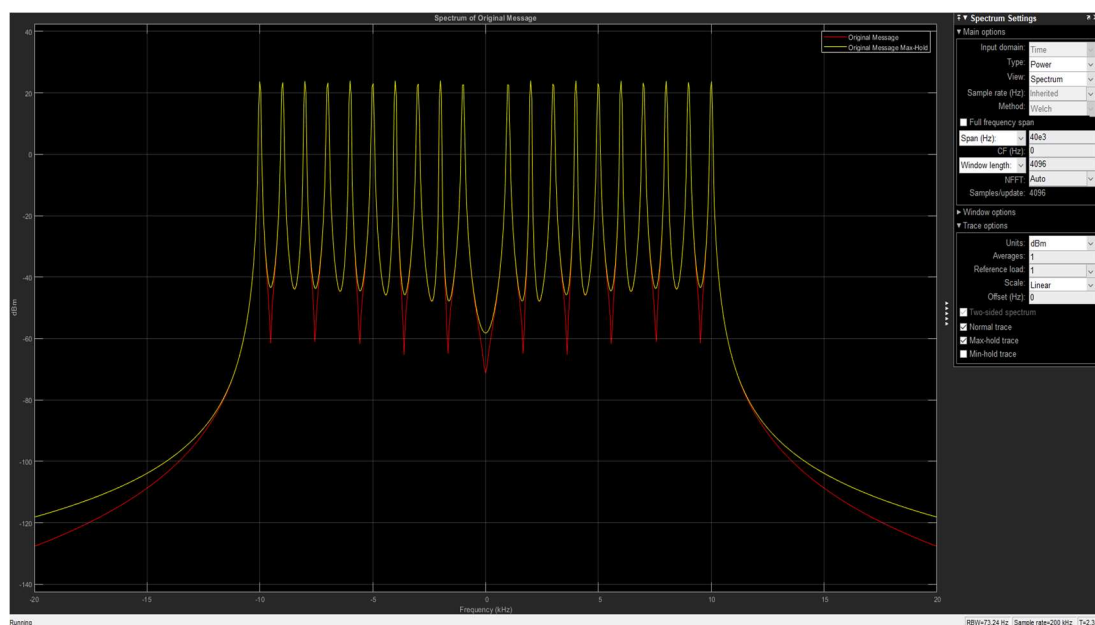
Kuva 19. Sanomasignaalin spektri demodulaattorissa alipäästösuodattimen jälkeen.

6. DSB-MODULAATTORIN TOTETUS

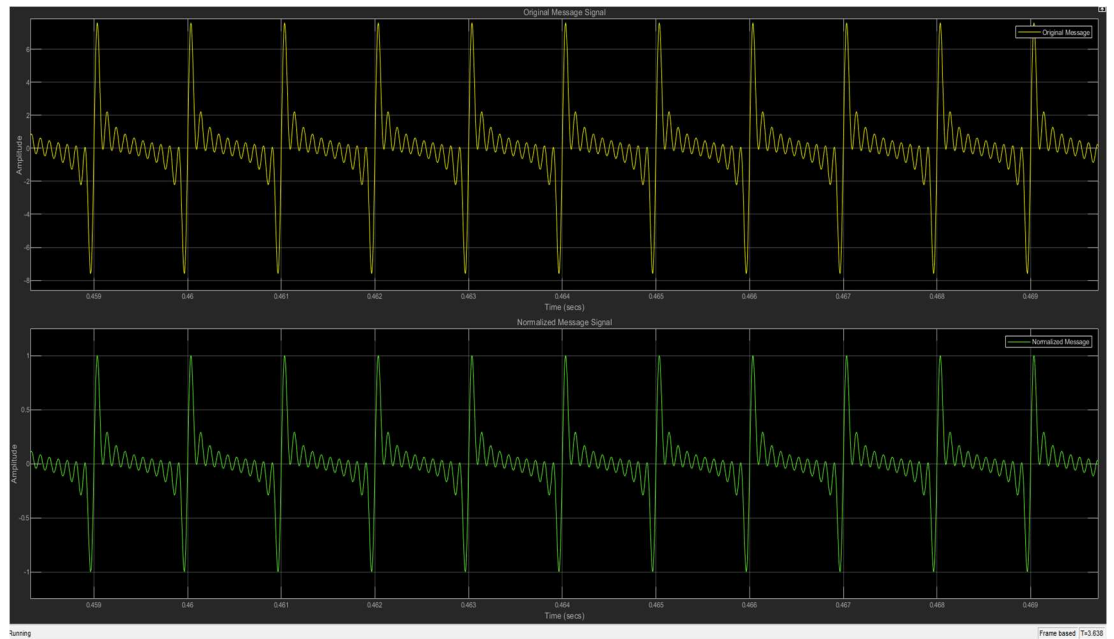
DSB-modulaattorin toteutus on hyvin lähellä AM-modulaattorin toteutusta. Modulaattorin rakenne on esitetty kuvassa 20. Informaatiosignaali luodaan samalla tavalla ja kyseisen signaalin spektri voidaan nähdä kuvassa 21. DSB-moduloinnin ero AM-modulointiin on modulaatioindeksin puuttuminen sekä se, että normalisoitu signaali siirtyy suoraan USRP:n lähetinlohkoon. Ero alkuperäisen informaatiotiedon ja normalisoidun signaalin välillä voidaan havaita kuvasta 22. Kuten AM-modulaatiossa, normalisoidun signaalin amplitudi vaihtelee pienemmällä välillä mitä alkuperäisen informaatiotiedon amplitudi. Viimeisenä kuvassa 23 on lähetettävän signaalin spektri, jossa voidaan nähdä normalisoinnin vaikutus informaatiotiedon spektriin.



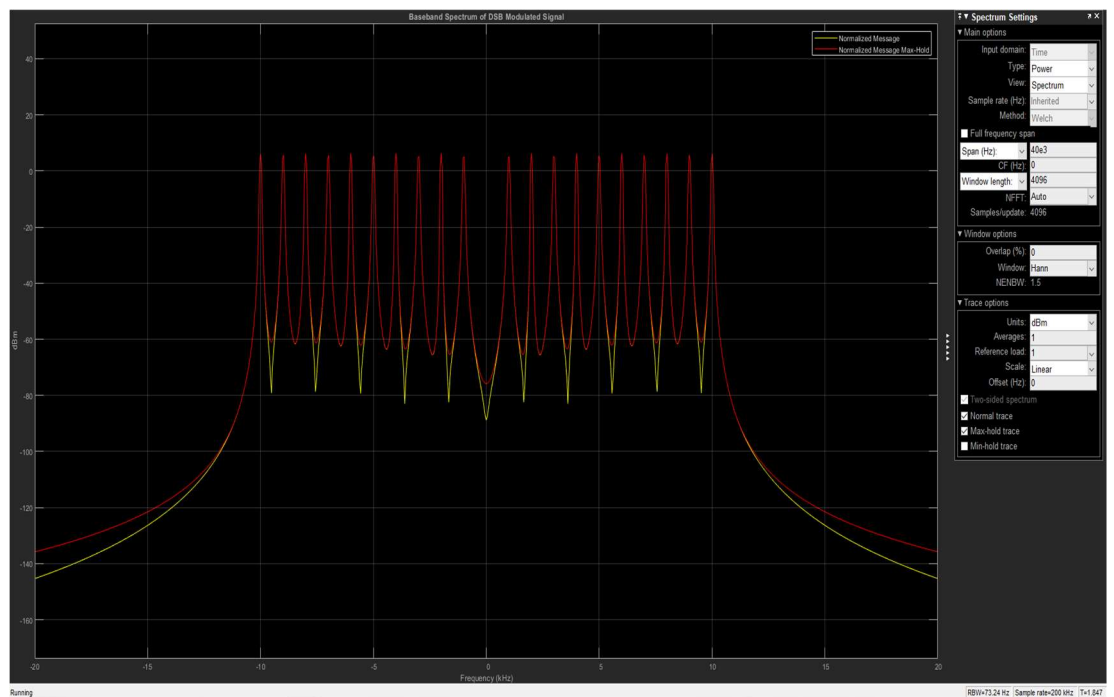
Kuva 20. DSB modulaattorin lohkokkaavio Simulink-ympäristössä.



Kuva 21. Informaatiosignaalin spektri DSB-modulaattorissa.



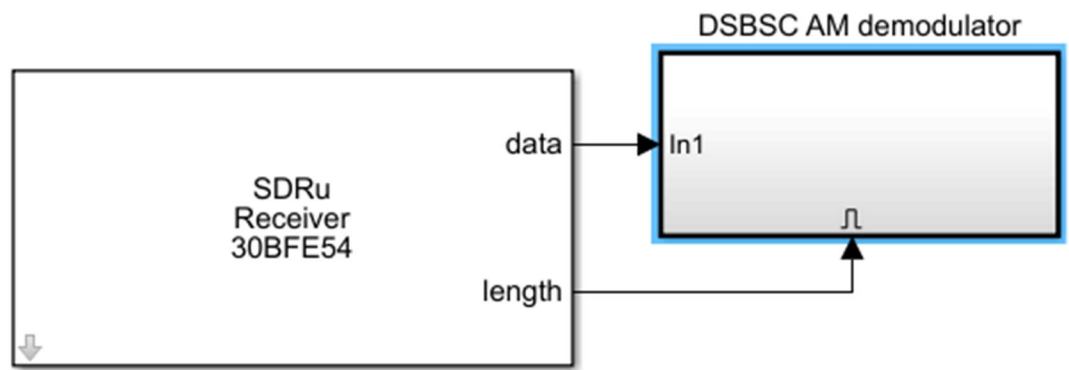
Kuva 22. Alkuperäinen informaatiot signaali ja normalisoitu DSB-signaali.



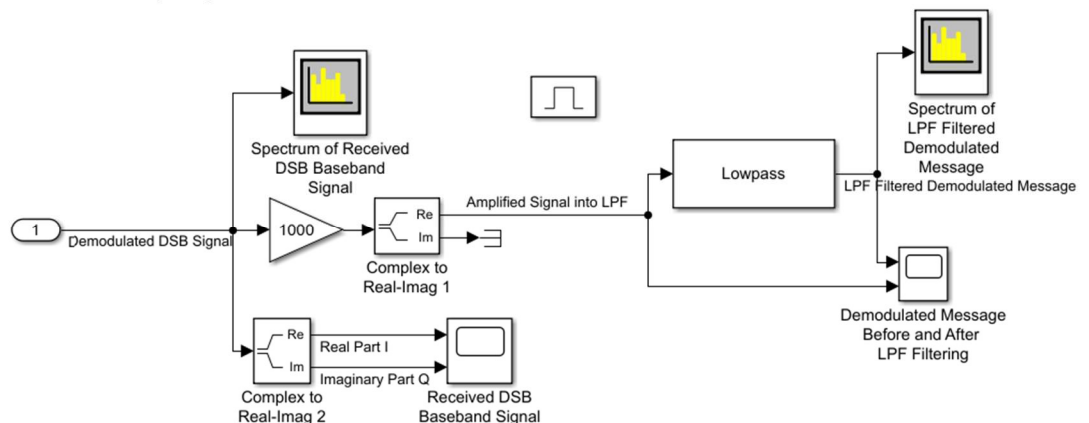
Kuva 23. Lähetettävän DSB-signaalin spektri.

7. DSB-DEMODULAATTORIN TOTEUTUS

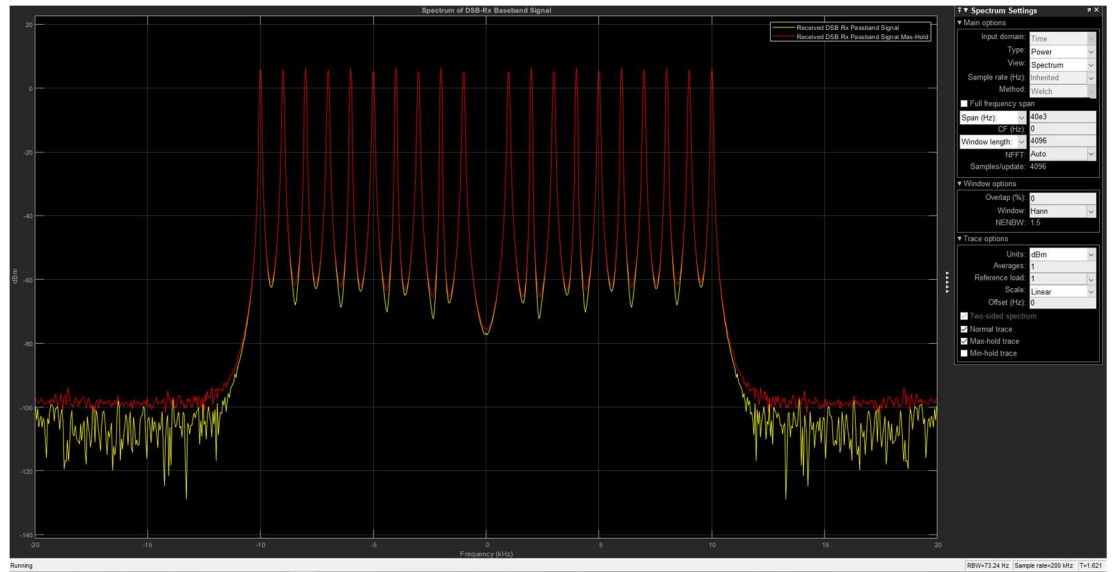
DSB-demodulaattori vastaanottaa signaalin USRP:n vastaanotinlohkoon, joka on esitetty kuvassa 24. Siitä signaali etenee alijärjestelmään, joka on kuvattu tarkemmin kuvassa 25. Vastaanotetun kantataajuussignaalin spektri sekä reaaliset ja imaginääriset osat ovat esitetty kuvissa 26 ja 27. Seuraavaksi signaalia vahvistetaan ja siitä erotellaan reaaliset ja imaginääriset osat erilleen. Reaaliset komponentit syötetään alipäästösuodattimeen ja imaginääriset komponentit terminoidaan. Alipäästösuodattimen vaikutus voidaan tässäkin simuloinnissa havaita kuvasta 28, josta ilmenee kuinka korkeataajuiset komponentit ovat poistuneet alipäästösuodattimessa. Viimeisenä suodattimen jälkeisen signaalin spektri voidaan nähdä kuvasta 29. Kuvasta nähdään, ettei DSB-demoduloidulla signaalilla ole DC-komponenttia kuten AM-demoduloidulla signaalilla kuvassa 19.



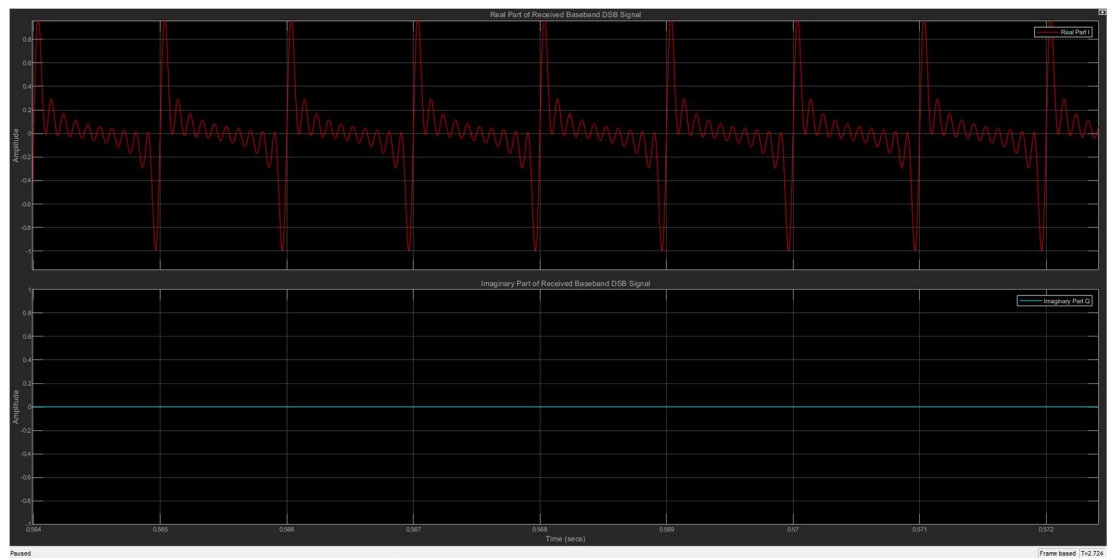
Kuva 24. Käytetyn DSB-demodulaattorin lohkokaavio.



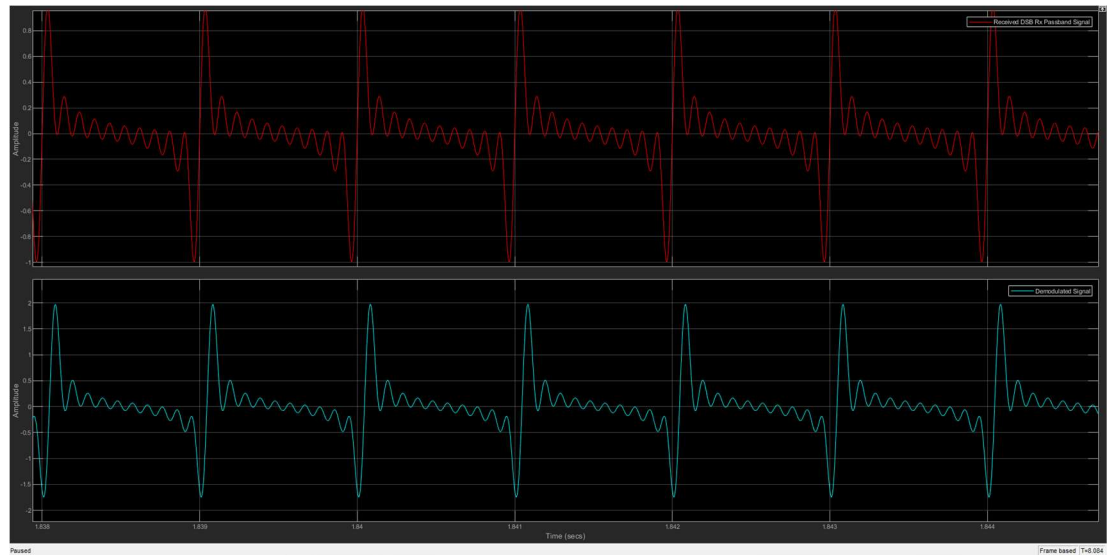
Kuva 25. DSB-demodulaattorin alisysteemin lohkokaavio avattuna.



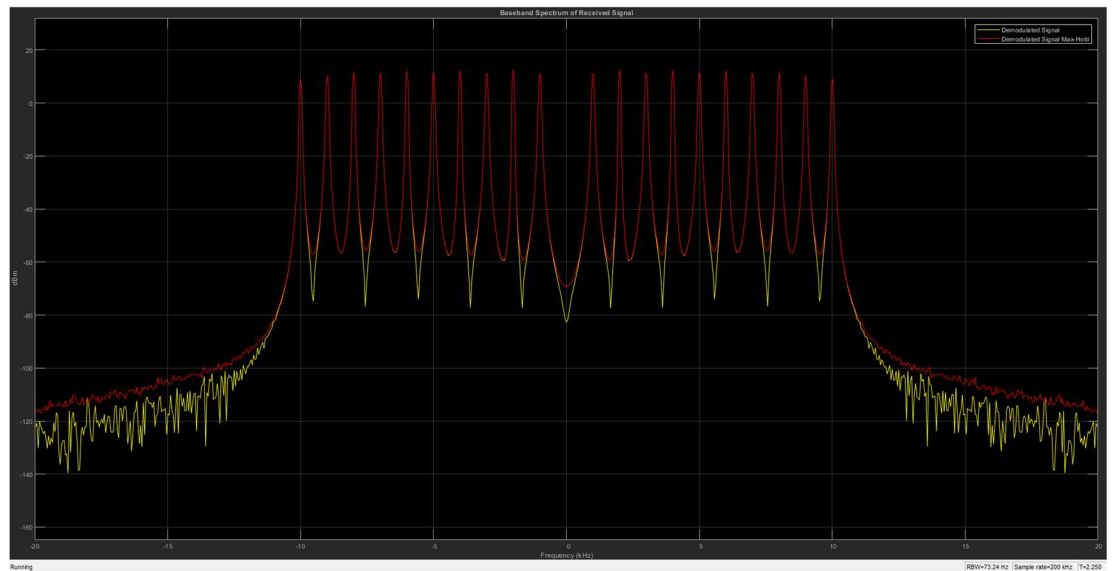
Kuva 26. Vastaanotetun kantataajuussignaalin spektri.



Kuva 27. Vastaanotetun kantataajuussignaalin reaaliset ja imaginääriset osat.



Kuva 28. Signaalin muoto ennen ja jälkeen alipäästösuodatinta.



Kuva 29. DSB-demoduloidun signaalin spektri alipäästösuodattimen jälkeen.

8. POHDINTA

Työssä käytetyn NI-2900 laitteen toimintaperiaate tuli hyvin tutuksi ja tuloksena saadut amplitudimodulaation ja -demodulaation kuvaajat antoivat hyvän kuvan siitä, miten matemaattisesti aluksi esitelty modulaatiotekniikka toimii käytännössä. Tulokset olivat selkeitä ja johdonmukaisia ja niitä voi helposti hyödyntää suunniteltaessa monimutkaisempia lähetinvastaanotin lohkokaavioita eri modulaatiomenetelmille.

Ohjelmistoradiot yleistyvät yhä enemmän teollisuudessa, joten tämä työ oli oivallinen tapa lähestyä ohjelmistoradion tekniikkaa ja oppia perusteet sen käytöstä. MATLAB-Simulink ympäristö on myös hyvin yleinen työkalu tietoliikennetekniikan maailmassa, joten on mielestäni suotavaa, että työ toteutettiin juuri tässä ympäristössä. Muita ympäristöjä ovat esimerkiksi LabVIEW- ohjelmisto, joka omaa mielestäni paljon monimutkaisemman käyttöliittymän käyttäjälle.

Toteutus Simulink ympäristössä oli selkeää alusta lähtien ja suuren käyttäjäkunnan ansiosta esimerkkejä modulaatiotekniikoiden toteutuksesta on olemassa hyvin riittävästi. Simulink-ympäristön käyttö on varsin helppo opetella ja lohkojen käyttö on yksinkertaista ja mielestäni paljon selkeämpää kuin vastaavassa LabVIEW mallissa. Toisaalta kirjoittajalla oli työtä aloittaessa jo kokemusta Simulink-mallinnuksesta, joten liikkeelle lähtö oli helpompaa kuin mitä se olisi ensikertalaisella. Käytön opettelu on kuitenkin hyvin nopeaa ja USRP antaa myös hyvät ohjeet sen käyttämistä lohkoista sekä niiden komentoista ja parametrisoinneista. Mielestäni Simulink-lohkojen parametrisointi on toteutettu selkeästi ja niiden vaihtaminen simuloinninkin aikana on helppoa, kunhan vain tietää mitä parametria vaihtaa ja miksi. Simulink antaa myös hyvin ohjeita jokaisesta lohkoista ja selittää jokaisen parametrin selkeästi, jos käyttäjä ei ole tietoinen kyseisen parametrin vaikutuksesta simulointiin. Mathworksin omalta sivulta löytyy paljon tietoa jokaisesta lohkoista ja komennosta, joten käyttäjä löytää varmasti vastauksia ongelmiinsa. Kaikin puolin tämä tutkielma oli mielenkiintoinen toteuttaa ja itse laite on kiinnostava sen rajattomien käyttökohteiden ansiosta. Ohjelmistoradiot ovat väistämättä tärkeä osa tulevaisuuden tekniikka ja on kiinnostavaa nähdä mitä kaikkea se tarjoaa tietoliikenteen alalle lähivuosina.

9. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa tutkittiin ohjelmistoradion toimintamallia käyttäen National Instrumentsin kehittämää USRP NI-2900 laitetta. Työssä luotiin MATLAB-Simulink ympäristöön digitaaliset modulaattorit ja demodulaattorit amplitudi- ja kaksisivukaistamodulaatioille. Ohjelmistoradion rakennetta kuvattiin lohkokaaavioin ja sen toiminta esitettiin tarvittavien matemaattisten kaavojen avulla. Toiminta näissä laitteissa perustuu digitaaliseen signaalinkäsittelyyn, jossa suuri osa laitteistosta on korvattu ohjelmistolla. Näin radioiden laitteisto-ongelmat muuttuvat ohjelmisto-ongelmiksi. Ohjelmisto-ongelmien tutkiminen ja muutosten testaus on paljon helpompaa kuin laitteistolla, mikä helpottaa suunnitteluprosessia ja kehitystyötä.

Ohjelmistoradion käyttö vaati tiettyjen lisäosien asentamisen MATLAB-ohjelmistoon sekä USRP-ajurin päivityksen ensimmäisellä käyttökerralla. Ohjelmistoradion toiminta Simulink-ympäristössä perustuu USRP:n omiin lähetin- ja vastaanotin lohkoihin, jotka yhdistetään Simulink:n omiin yleisiin lohkoihin, joita käyttäjä voi muokata haluamallaan tavalla riippuen siitä, miten hän haluaa signaalia moduloida. Signaalin lähetys tapahtuu joko ilmarajapinnan tai koaksiaalikaapelin välityksellä. Kokonaisuutta ohjataan USB-väylän kautta.

Amplitudimodulaatiossa generoituun kantoaaltoon lisätään informaatio-signaali, jolle on määritetty modulaatioindeksi, jolloin muodostuu sivukaistoja, jotka sisältävät lähetettävän informaation esimerkiksi äänilähetteen. Kaksisivukaistamodulaatio on hyvin samankaltainen kuin amplitudimodulaatio pienillä eroilla kuten biasjännitteen ja modulaatioindeksin puuttumisella. AM ja DSB modulaattoreiden ja -demodulaattoreiden lohkokaaviot esiteltiin Simulink-ympäristössä selittäen rakennettujen lohkojen toiminta ja parametrisointi. Mallit antavat signaalien spektrin ja aaltomuotokuvaajan käyttäjän haluamassa kohdassa, mikä helpottaa signaalinkäsittelyä ja simuloitavan tietoliikennejärjestelmän toiminnan ymmärtämistä. Lohkoja ja niiden parametreja on helppo vaihdella simuloinnin aikanakin, jolloin niiden vaikutuksen näkee reaaliajassa. Rakennettu lähetinvastaanotin kaavio oli toimiva ja aaltomuodon tutkiminen eri vaiheissa oli helppoa. Lopuksi pohdittiin järjestelmän toimivuutta ja käyttökokemusta simuloinnista ja sen toiminnallisuuksien ominaisuuksista.

10. LÄHTEET

- [1] Back Andrew (luettu 13.11.2018) Ohjelmistoradion käyttökohteet URL: <https://www.rs-online.com/designspark/10-things-you-can-do-with-software-defined-radio>
- [2] National Instruments (luettu 27.1.2019) Software Defined Radio URL: <http://www.ni.com/fi-fi/shop/select/software-defined-radio-device>
- [3] Signals and Modulation (luettu 27.1.2019) IQ Signals URL: http://www.ece.uvic.ca/~elec350/lab_manual/data/35015-IQ-AM-SSB-FM-PSK16.pdf
- [4] National Instruments (luettu 27.1.2019) What is NI USRP Hardware URL: <http://www.ni.com/white-paper/12985/en/>
- [5] Electronicsnotes (luettu 27.1.2019) Amplitude Modulation URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/amplitude-modulation-am-bandwidth-spectrum-sidebands.php>
- [6] Introduction to Naval Weapons Engineering (luettu 27.1.2019) Amplitude Modulation URL: <https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/AM.htm>
- [7] Kärkkäinen K. (2018). Tietoliikennetekniikka: Analogiset kantaalto- ja pulssimodulaatiomenetelmät, luentomateriaali.
- [8] Mathworks (luettu 27.1.2019) USRP Support Package URL: <https://se.mathworks.com/hardware-support/usrp.html>
- [9] Zadig (luettu 27.1.2019) USB driver installation made easy URL: <https://zadig.akeo.ie/>
- [10] Mathworks (luettu 27.1.2019) SDRu Transmitter URL: https://se.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/sdrutransmitter.html?s_tid=doc_ta
- [11] Mathworks (luettu 27.1.2019) SDRu Receiver URL: <https://se.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/sdrureceiver.html>

11. LIITTEET

Simuloitujen mallien oleelliset parametrit:

AM-Tx

Multiple Sine Waves

- Sample time $1/(200\text{e}3)$

- Samples per frame 1

MinMax Running Resettable

- Initial condition 1

SDRu Transmitter

- Master clock rate $5\text{e}6$

- Interpolation factor 25

AM-Rx

SDRu Receiver

- Master clock rate $5\text{e}6$

- Decimation factor 25

- Sample time $1/(5\text{e}6)$

- Samples per frame 1

Lowpassa Filter

- Passband edge frequency $11\text{e}3$

- Stopband edge frequency $14\text{e}3$

- Maximum passband ripple 0.1

- Minimum stopband attenuation 80

DSB-Tx

Multiple Sine Waves

- Sample time $1/(200\text{e}3)$
- Samples per frame 1

MinMax Running Resettable

- Initial condition 1

SDRu Transmitter

- Master clock rate $200\text{e}3$
- Interpolation factor 1

DSB-Rx

SDRu Receiver

- Master clock rate $200\text{e}3$
- Decimation factor 1
- Sample time $1/(200\text{e}3)$
- Samples per frame 1

Lowpassa Filter

- Passband edge frequency $10\text{e}3$
- Stopband edge frequency $12\text{e}3$
- Maximum passband ripple 0.1
- Minimum stopband attenuation 80